

文章编号:1000-582X(2010)10-098-04

# 新型基片集成波导宽带带通滤波器

陈世勇<sup>1</sup>, 田树林<sup>1</sup>, 孟 德<sup>1</sup>, 杨 琳<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆通信学院, 重庆 400035)

**摘 要:**利用基片集成波导的高通传输特性以及光子带隙结构的阻带特性,构建了一种新型结构的基片集成波导带通滤波器。为了验证该想法,设计了 1 个中心频率为 5.0 GHz,分数带宽为 60%的滤波器,电磁仿真结果表明该滤波器在频率为 3.5~6.5 GHz 频率范围内具有明显的通带特性,带内最大插入损耗约为 0.64 dB。利用 PCB 工艺制作了该滤波器的实物,使用矢量网络分析仪对其进行了测试,测试结果表明该滤波器的通带为 3.8~6.8 GHz,分数带宽约为 56%,带内最小插入损耗为 1.6 dB。电磁仿真结果和实际测试结果较一致。

**关键词:**基片集成波导;矩形开口环谐振器;光子带隙;带通滤波器

**中图分类号:** TN713

**文献标志码:** A

## A novel substrate integrated waveguide broadband bandpass filter

CHEN Shi-yong<sup>1</sup>, TIAN Shu-lin<sup>1</sup>, MENG De<sup>1</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, P. R. China)

**Abstract:** A novel broadband substrate integrated waveguide bandpass filter is presented based on the highpass characteristics of substrate integrated waveguide (SIW) and the bandstop performance of photonic band gap (PBG) structure. In order to verify it, a wideband bandpass filter with center frequency of 5.0 GHz and fractional bandwidth of 60% is designed. The electromagnetic simulation results show its good passband characteristics from 3.5 GHz to 6.5 GHz, and the maximum insertion loss is about 0.64 dB. An experimental filter prototype is fabricated with standard PCB technics and measured with the vector network analyzer. The measured results show the passband is from 3.8 GHz to 6.8 GHz, the fractional bandwidth is about 56%, and the minimal insertion loss is about 1.6 dB. The measured results are in good agreement with the simulated results.

**Key words:** substrate integrated waveguide; rectangular split ring resonator; photonic band gap; bandpass filter

金属矩形波导由于具有 Q 值高,功率容量大等优点,被广泛应用于微波有源、无源电路设计中。随着微波集成电路的发展,要求将各种电路集成到同一块介质基板上,矩形波导的腔体结构形式难于与其他平面电路集成,并且其加工成本较高。为了保证电路具有高的 Q 值并且易于和其他平面电路集成,近年来提出了基片集成波导的概念。基片集成波导<sup>[1-4]</sup>通常是利用

基片的上下金属板和 2 排间隔一定距离的金属通孔构成,通孔之间小的间距可以防止电磁波从基片侧面辐射,使得基片集成波导相当于内部填充了介质的矩形金属波导,从而具有和普通金属波导相似的传输特性及高的品质因数。采用普通矩形波导实现的电路结构基本可以用基片集成波导来实现。研究人员通过在集成波导中插入改变其宽度的膜片和销钉实现电感耦

收稿日期:2010-04-24

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2009BB2205)

作者简介:陈世勇(1975-),男,重庆大学博士,主要从事射频电路方向研究,(Tel)15998930312;(E-mail)chensy@cqu.edu.cn。

合,实现了基片集成波导的窄带集成波导带通滤波器<sup>[5-9]</sup>;基于低通和集成波导组合的 SCMRC 结构实现了小型化的宽带基片集成波导带通滤波器<sup>[5-6]</sup>;另外,文献[10]介绍了通过  $TE_{102}$  和  $TE_{201}$  2 种模式耦合实现的双模集成波导滤波器,该滤波器在带外产生了 1 个传输零点,使得阻带更陡峭,大大提高了滤波器的频率选择特性,双模及 SMCR 构成的集成波导滤波器由于结构比较复杂,因此电路的初始尺寸计算精度不高,需要进行较长的时间进行三维电磁优化仿真。

PBG 结构通过在微带电路的上表面或接地板上刻蚀缺陷图案,改变微带电路屏蔽电流的分布,从而改变传输线的等效电感和等效电容,获得慢波和禁带特性<sup>[11]</sup>。对于利用 PBG 的带阻特性实现宽带集成波导带通滤波器还鲜有报道,笔者分析了集成波导传输特性和 PBG 结构带阻特性,利用 SIW 的高通特性以及 PBG 的阻带特性构建了 1 种新型的宽带集成波导滤波器。为了验证该想法,设计了 1 个中心频率 5.0 GHz,分数带宽为 60% 的滤波器,并利用平面电路的 PCB 工艺制作了该滤波器的实验电路,测试结果表明滤波器具有从 3.8~6.8 GHz 的通带,滤波器相对带宽达到 56%,带内最小插入损耗约为 1.6 dB,与电磁仿真结果较一致。

## 1 基片集成波导-矩形槽宽带带通滤波器的设计

### 1.1 基片集成波导传输特性的分析

单层基片集成波导的结构如图 1 所示,厚度为  $h$  的介质基片的上下表面均为金属化层,在介质基片中刻蚀了中心间距宽度为  $C$  的 2 排金属化通孔,通孔之间的距离为  $w$ ,于是在上下金属面和两排金属通孔间就形成了 1 个类似于金属矩形波导的结构。当电磁波在两排金属化通孔之间传输时,其传输特性和波在传统金属波导中的传输特性类似。

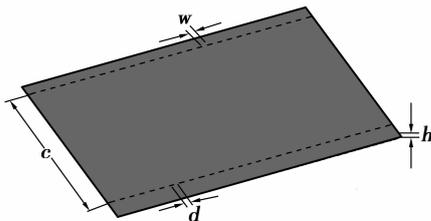


图 1 基片集成波导的结构图

文献[3]通过大量理论分析和数值计算指出只要集成波导的结构尺寸满足  $d/c < 0.2$  和  $w/d < 3$ ,基片集成波导宽度  $c$  与等效矩形波导宽度  $c_{\text{eff}}$  的关系可以通过下面的经验公式给出:

$$c_{\text{eff}} = c - 1.08 \frac{d^2}{w} + 0.1 \frac{d^2}{c} \quad (1)$$

根据金属波导的色散特性可以计算基片集成波导  $TE_{10}$  主模的截止频率  $f_{TE_{10}}$ <sup>[12]</sup>

$$f_{TE_{10}} = \frac{C_0}{2c_{\text{eff}} \sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

其中: $c_0$  为光速; $\epsilon_r$  为介质基板的相对介电常数。

根据上述设计原则,采用介电常数  $\epsilon_r$  为 2.65 的聚四氟乙烯材料作为基板,基片集成波导的通孔直径为  $d=0.6$  mm,通孔之间的距离  $w=1.2$  mm, $c=27$  mm,基板的厚度  $h=1$  mm。使用 HFSS 三维电磁仿真软件对该尺寸基片集成波导进行了电磁三维仿真,对应的散射参数如图 2 所示,可以看出集成波导具有金属矩形波导相似的高通特性,其截止频率约为 3.50 GHz,与由式(2)计算出的截止频率为 3.45 GHz 基本吻合。

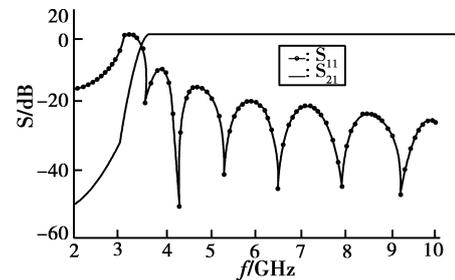


图 2 集成波导频率响应曲线

### 1.2 基片集成波导-矩形槽滤波器的设计

PBG 具有的在一定频段的阻带特性,广泛的应用于微波无源电路设计中。对应的阻带频率和刻蚀的 PBG 单元尺寸以及 PBG 单元周期有关。为了保持电路的大面积接地,采用的是在集成波导的信号层刻蚀的方案。为了减小矩形槽可刻蚀的横向尺寸,采用了如图 3 所示的弯折的矩形槽 PBG 结构单元,对应矩形槽中间部分的长度  $a=6$  mm,宽度  $b=2$  mm,槽的纵向长度为  $e$ ,可以通过改变  $e$  值的大小来调整 PBG 结构的阻带中心以及滤波器的通带特性。

为了使得集成波导和微带线相连接,需要进行集成波导和微带线之间的转换设计。根据微带锥形转换线设计理论<sup>[1]</sup>,由传统矩形波导  $TE_{10}$  模等效阻抗<sup>[13]</sup>可以得出基片集成波导  $TE_{10}$  模等效阻抗<sup>[14]</sup>,得出微带锥形转换线的设计尺寸。

基于以上对滤波器各部分结构的分析,设计了 1 个中心频率为 5.0 GHz,分数带宽为 60% 的基片集成波导-矩形槽谐振器的带通滤波器,滤波器对应的电路结构如图 4 所示,其中集成波导的尺寸为: $c=27$  mm, $w=1.2$  mm, $d=0.6$  mm, $h=1$  mm;50  $\Omega$  微带线尺寸: $L_2=5$  mm, $W_{50}=2.72$  mm;微带锥形转换

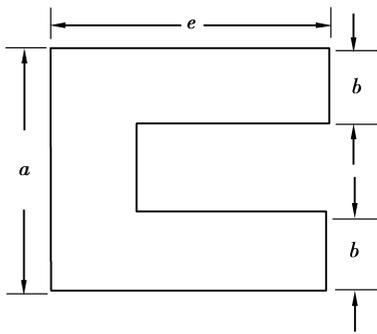


图 3 单个谐振器的几何图形和尺寸

线尺寸:  $L_1 = 15 \text{ mm}$ ,  $W_2 = 6 \text{ mm}$ ; 槽的尺寸为:  $e_1 = 5.65 \text{ mm}$ ,  $e_2 = 5.75 \text{ mm}$ ,  $e_3 = 5.75 \text{ mm}$ ; 槽与槽之间的距离:  $g_1 = 2.7 \text{ mm}$ ,  $g_2 = 5 \text{ mm}$ ,  $g_3 = 4.25 \text{ mm}$ 。由于整个滤波器尺寸是关于中心对称的, 所以图中只标出了滤波器右半平面的尺寸。整个滤波器的长度  $L = 102 \text{ mm}$  (包括了微带转换线的长度)。

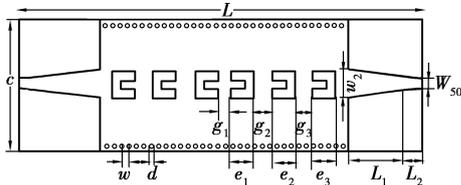


图 4 基片集成波导带通滤波器结构示意图

采用 HFSS 软件对该滤波器结构进行了电磁仿真, 滤波器的插入损耗、回波损耗仿真结果如图 5 所示, 可以看出滤波器的中心频率为  $5.0 \text{ GHz}$ , 工作带宽大约为  $3 \text{ GHz}$ , 在  $3.5 \sim 6.5 \text{ GHz}$  的通带内, 最大插入损耗约为  $0.64 \text{ dB}$ , 回波损耗小于  $-13 \text{ dB}$ , 分数带宽约为  $60\%$ 。

## 2 测试结果及讨论

根据电路的设计尺寸, 集成波导带通滤波器在厚度为  $1 \text{ mm}$ , 相对介电常数为  $2.65$  的聚四氟乙烯介质基板上, 利用传统的 PCB 工艺加工而成。采用 Anritsu MS4624D 矢量网络分析仪对加工的实验滤波器进行了测试, 插入损耗和回波损耗测试结果如图 5 所示, 可以看出带通滤波器的通带从  $3.8 \sim 6.8 \text{ GHz}$ , 带内最小插入损耗约为  $1.6 \text{ dB}$ , 在  $8.1 \text{ GHz}$  处带外抑制达到  $-50 \text{ dB}$ 。整个滤波器的相对带宽达到  $56\%$ 。对比滤波器的 S 参数仿真结果图 6 可以看出, 实际测量滤波器带宽略有减小, 测量的最小插入损耗比软件仿真结果差  $1 \text{ dB}$  左右, 其主要原因是 SMA 同轴微带转换接头的损耗导致测量滤波器的插入损耗增加。

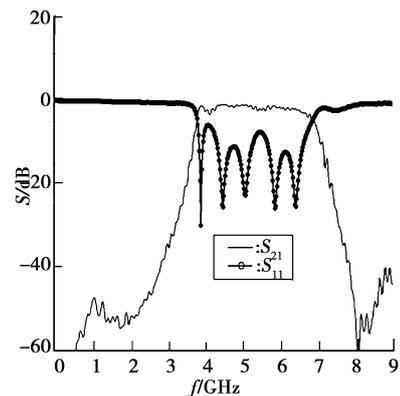


图 5 SIW 和矩形槽带通滤波器的 S 参数仿真结果

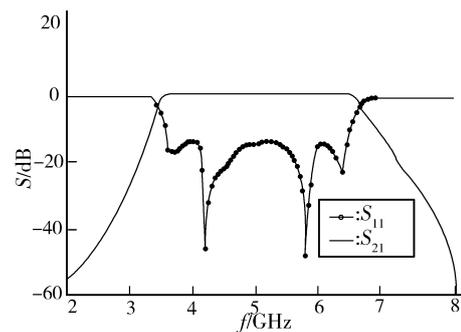


图 6 SIW 带通滤波器的 S 参数测试结果

## 3 结论

在介绍了基片集成波导的传输特性、PBG 结构的阻带特性以及微带锥形转换线的基础上, 通过在 SIW 信号层刻蚀一定规律的矩形槽构建了一种宽带 SIW 带通滤波器。对其进行电磁仿真和实际电路的制作和测试, 结果表明该滤波器具有  $56\%$  的分数带宽, 通带内波纹平坦、插损小, 阻带较深。该类型的滤波器结构简单、生产成本低、易于加工, 对于微波 SIW 宽带滤波器设计具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] YAN L, HONG W, WU K, et al. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines [J]. IEEE Proceedings-H: Microwaves, Antennas and Propagation, 2005, 152(1): 35-42.
- [2] ZHANG Y L, HONG W, WU K, et al. Novel substrate integrated waveguide cavity filter with defected ground structure [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(4): 1280-1287.
- [3] WU K, XU F. Guided wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(1): 66-73.
- [4] SONG K, FAN Y, ZHANG Y. Eight-way substrate

- integrated waveguide power divider with low insertion loss[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(6): 1473-1477.
- [5] CHE W Q, DENG K, WANG D P, et al. Improved spiral compact microstrip resonance cell low-pass filter with wide stopband characteristics[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(1): 121-124.
- [6] CHE W Q, DENG K, XU L, WANG D P. A compact wide-band bandpass filter integrating SCMRC and SIRW structures[J]. Nanjing University of Science and Technology, 2006, 49(1): 195-198.
- [7] 湛正良, 吴先良, 丁让箭. 基于介质销钉的基片集成波导带通滤波器的设计[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2007, 15(1): 59-61.  
CHEN ZHENG-GEN, WU XIAN-LIANG, DING RANG-JIAN. Design of substrate integrated waveguide (SIW) bandpass filter based on centered dielectric posts[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture, Natural Science Edition, 2007, 15(1): 59-61.
- [8] 冉亮, 吴先良, 丁让箭. 偏置介质销钉基片集成波导带通滤波器的设计[J]. 安徽工业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 45-47.  
RAN LIANG, WU XIAN-LIANG, DING RANG-JIAN. Design of offset dielectric post bandpass filter based on substrate integrated waveguide[J]. Journal of Anhui University Technology: Natural Science Edition, 2007, 31(2): 45-47.
- [9] 吴先良, 丁让箭, 吴琼. 基片集成波导带通滤波器的设计[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(3): 394-396.  
WU XIAN-LIANG, DING RANG-JIAN, WU QIONG. Design of substrate integrated waveguide(SIW) bandpass filters[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 30(3): 394-396.
- [10] 张胜, 王子华, 肖建康, 等. 一种新型的基片集成波导双模带通滤波器[J]. 压电与声光, 2006, 28(6): 674-676.  
ZHANG SHENG, WANG ZI-HUA, XIAO JIAN-KANG, et al. A novel substrate integrated waveguide (SIW) dual-mode bandpass filter[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2006, 28(6): 674-676.
- [11] YABLONOVITCH E. Photonic band-gap structures [J]. Optical Society of America B Optical Physics, 1993, 10(2): 283-295.
- [12] CASSIVI Y, PERREGRINI L, ARCIONI P, et al. Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide[J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2002, 9(12): 333-335.
- [13] 盛振华. 电磁场与微波技术与天线[M]. 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [14] 邓磊, 唐高弟. 基片集成波导传输特性分析和应用仿真[C]//第二届全国信息与电子工程学术交流会暨第十三届四川省电子学会曙光分会学术年会. 成都四川省电子学会曙光分会学术年会论文集, 四川, 2006: 306-310.

(编辑 侯 湘)

(上接第 97 页)

## 参考文献:

- [1] RANE S, SAPIRO G, BERTALMIO M. Structure and texture filling-in of missing image blocks in wireless transmission and compression applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(3): 296-303.
- [2] MARCELO B. Strong continuation, contrast invariant inpainting with a third-order optimal PDE [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(7): 1934-1938.
- [3] MARCELO B, LUMINITA V, GUILLERMO S. Simultaneous structure and texture image inpainting[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 882-889.
- [4] CHAN T F, SHEN J H. Mathematic models for local non-texture inpainting[J]. SIAM J Appl Math, 2001, 62(3): 1019-1043.
- [5] CHAN T F, SHEN J H. Non-texture inpainting by curvature driven diffusions (CDD) [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2001, 12: 436-449.
- [6] ZHANG H Y, PENG Q C, WU Y D. Wavelet inpainting based on p-laplace operator [J]. Acta automatica sinica, 2007, 33(5): 546-549.
- [7] JIN L H, LI D H, SONG E M. Combining vector ordering and spatial information for color image interpolation [J]. Image and Vision Computing, 2009, 27: 410-416.
- [8] JEAN-FRANCOIS A. Some first-order algorithms for total Variation based image restoration [J]. J Math Imaging Vis, 2009, 34: 307-327.
- [9] ZHONG J M, SUN H F. Wavelet-based multiscale anisotropic diffusion with adaptive statistical analysis for image restoration [J]. IEEE Trans Circuits and Systems-I; Regular Papers, 2008, 55(9): 2716-2725.
- [10] MA J, FENN M. Combined complex ridgelet shrinkage and total variation minimization [J]. SIAM J Science. Computer, 2006, 28(3): 984.1 000.
- [11] PLONKA G, MA J. Nonlinear regularized reaction-diffusion filters for denoising of images with textures [J]. IEEE Trans Image Process, 2008, 17(8): 1283-1294.
- [12] JULIA A, ANDREA L. A wavelet-laplace variational technique for image deconvolution and inpainting [J]. IEEE Trans Image Process, 2008, 17(5): 657-663.
- [13] CHAN T F, SHEN J, ZHOU H M. Total variation wavelet inpainting [J]. Math J Image Vision, 2006, 25(1): 107-125.
- [14] ALEXANDRU K, HANNELORE L, CSABA A. Multiple solutions for p-laplacian type equations [J]. Nonlinear Analysis-Theory Methods & Applications, 2008, 68(5): 1375-1381.
- [15] BLOMGREN P V, CHEN T F. Color TV: total variation method for restoration of vector valued images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 304-309.

(编辑 侯 湘)